



OCTAVIO PUCHE RIART

# I.1. Encuadre histórico general: cultura, ciencia y tecnología de las aguas subterráneas

## INTRODUCCIÓN

El hombre inicialmente se acerca al recurso hídrico para su aprovechamiento, pero no comprende su origen. También se asombra ante las catástrofes generadas por el temporal o por el efecto vivificante del agua sobre los cultivos. Surgen cosmogonías acuáticas y con frecuencia, dioses de las fuentes o de los manantiales, así como de la lluvia; tal es el caso de *Kon*, entre los incas, o *Tlaloc* entre los aztecas, y *Chac* entre los mayas, por poner algún ejemplo.

Poco a poco progresará el conocimiento sobre el agua y se irán identificando los diversos momentos del ciclo hidrológico. La precipitación, escorrentía y evaporación de las cuencas, serán cuantificadas entre los siglos XVII y XVIII, pudiéndose determinar el balance hídrico de un territorio. También mejorarán las técnicas de captación, aunque no siempre de acuerdo con la evolución científica. Y, ya más modernamente a partir de mediados del siglo XIX, con la ley de Darcy, se conocerán las leyes que rigen los movimientos de agua en los acuíferos y en el entorno de los pozos. Por fin, ya en el siglo XX, se estructura la Hidrogeología como ciencia.

## LOS PRIMEROS REGADÍOS Y EL EMPLEO DE CAUDALES SUBTERRÁNEOS

El Neolítico se caracteriza por el nacimiento de la agricultura, así como por la creación de asentamientos humanos estables, próximos a las tierras de labor. No cabe duda que, con el desarrollo de los cultivos, pronto haría su aparición el regadío, empezando la construcción de presas y canales a ser algo habitual, tal y como se conoce por alguna de las tablillas de barro cocido, con escritura cuneiforme, de las culturas sumeria o acadia, en Mesopotamia. Las presas más antiguas que se conocen fueron descubiertas en Jawa (Jordania), en 1974, por los miembros de la *British School of Archeology* de Jerusalén. Estas presas, edificadas con piedra, se remontan al 3200 a.C. Estamos ante un conjunto de cinco embalses, el mayor de 80 m de longitud y 4,5 m de altura. Las de Saad-el-Kafara, en Egipto, son del 2600 a.C., y los de Mala'a, en el mismo país, del 1800 a.C. (Arenillas, 2003). También en Siria se conservan embalses con paramentos de piedra de gran antigüedad.

Posteriormente, vino la explotación de las aguas subterráneas con la construcción de pozos y *qanats*, o minas de agua.



## Encuadre histórico general: cultura, ciencia y tecnología de las aguas subterráneas

Los pozos más antiguos aparecen en la zona de Mesopotamia. Se atribuye al héroe legendario Gilgamesh (2700 a.C.), la excavación de pozos para obtener agua pura. Es tan importante el pozo en zonas áridas que su construcción asume tintes mitológicos. En la Biblia también hay numerosas citas. Una de las primeras referencias a destacar son los pozos construidos por Abraham (h. 1850 a.C.): “Volvió Isaac a abrir los pozos de agua que habían sido abiertos en los días de Abraham, su padre, y que los filisteos habían cegado después de la muerte de Abraham” (Génesis 26:18). Isaac aparece como el gran perforador de pozos; tal es el caso de los denominados: Eseq, Sitná, Rejobot, Berseba, Seba, etc. En este último, llegaron sus siervos y le dijeron: “hemos hallado agua”; se trata de una noticia importante en estas regiones desérticas. Isaac y su gente deben abandonar algunos de estos pozos por conflictos con otros clanes pastoriles, ya que el agua es un bien escaso. Cuando por fin desaparecen las pugnas, Isaac dijo: “Ahora Yahveh nos ha dado desahogo, y prosperaremos en esta tierra”. A veces se regula el uso del pozo entre grupos de pastores, tal y como se aprecia en Génesis 29: 2-3. También el pozo se convierte, en estos territorios, en el eje de la vida social, y en torno a su brocal se gestan los matrimonios de los patriarcas; este es el caso de: Isaac-Rebeca, Jacob-Raquel o Moises-Séfora.

En 2006, el equipo arqueológico de la Profesora Nájera (Universidad de Granada), descubre el pozo más antiguo de España. Este se ubica en el yacimiento arqueológico de Motilla de Azuer, a unos 10 km de Daimiel (Ciudad Real); está datado en el año 2200 a.C. y tiene 12 m de profundidad (*El Diario Montañés* 20-X-2008). Poco a poco, se iría generalizando el uso de los pozos para el abastecimiento urbano, tal es el caso de Atenas, en cuyo ágora hay más de cuatrocientos pozos, la mayoría de los siglos V y IV a.C. (Ratto, 2008).

Los *qanats* o *kanats* (Irán), *kareez* o *kariz* (Afganistán), *falaj* (península Arábiga), *fogara* o *khitarra* (Magreb), son minas de agua, captaciones de caudales subterráneos situados por lo general en depósitos de pie de monte, muy típicas de zonas áridas. De esta forma, hacia el año 2500 a.C., en la Edad del Bronce, en la zona de los montes Elburz, actual Irak, sacaban agua del interior de grandes conos de deyección, mediante galerías horizontales. Al oeste del río Nilo, hacia el 500 a.C., los egipcios regaban mediante *qanats* una superficie de 470.000 ha. Wuttmann *et al.* (2000), relacionan la construcción de *qanats* en el gran Oasis de Kharga, con la invasión persa de Egipto, acontecida el año 525 a.C. Estamos por tanto, ante una nueva técnica extractiva que viaja de Oriente a Occidente.

### EL AGUA ORIGEN DE LA VIDA: COSMOGONÍAS ACUÁTICAS

No cabe duda que la experiencia de los pueblos agrícolas del área mediterránea, así como de otras zonas, fue observar la acción del agua como fuente de vida, y sería en este contexto donde nacerán las primeras cosmogonías acuáticas. Este es el caso del poema mesopotámico *Enuma Elis*, donde la vida se inicia a partir de un caos acuático primordial: “Cuando arriba los cielos no existían, ni la tierra firme abajo tenía nombre, solo reinaban *Apsu* (Agua dulce) el progenitor, y *Tiamat* (Agua salada) la que gestó, las aguas se confundían en uno”. *Marduk*, rey de los dioses, luchará contra este caos acuático, personificado en el monstruo marino *Tiamat*, venciénolo.

La narración de relatos similares fue habitual en los territorios de Sumeria, Caldea o Egipto; por eso no es de extrañar, que el hombre religioso que escribe el relato del Génesis (Gen, 1: 1-2) ponga aquello de: “Al principio creó Dios los



Leviatán, Olaus Magnus (1555).

cielos y la tierra. La tierra era un caos y confusión y oscuridad por encima del abismo, y un viento de Dios aleteaba por encima de las aguas”. Basándose en estas historias arraigadas en su ámbito geográfico y contexto cultural, la novedad del autor bíblico es decir que Dios creó el Mundo a partir de la nada, ya que emplea el verbo *bará* que significa crear *ex nihilo* (Ruiz de la Peña, 1996), aunque no por ello rehúye del relato popular para su catequesis.

De este combate titánico contra el caos acuático/monstruo marino, quedan retazos en diversos textos bíblicos en relación con la Creación: Salmos 74: 12-15, 89: 10-11 y 104: 8-9; Isaías 5: 19 y 27: 1; Job 25: 10-13 y 38: 8-9, etc. Aquí el monstruo marino ya no se llama *Tiamat*, sino *Leviatán* o *Ráhab*. Veamos los textos del Salmo 74: 12-15: “Tu hendiste el mar con tu poder, quebraste las cabezas de los monstruos en las aguas, tu machacaste la cabeza del Leviatán y la hiciste pasto de las fieras”; y del Salmo 89: 10-11 (Himno del Creador): “Tu domeñaste el orgullo del mar, cuando sus olas se encrespaban las reprimías, tu machacaste a Ráhab, lo mismo que a un cadáver a tus enemigos dispersaste con tu potente brazo”.

En Egipto, *Ptah*, el señor de la vida, que era uno de los más antiguos y grandes dioses de Menfis, controla las aguas del Nilo desde su caverna. La tradición aseguraba que era el creador del Universo; aquí volvemos a encontrar la relación agua-creación-vida. Asimismo, en este territorio, una de las partes más importantes de los templos era el lago sagrado, manifestación de las aguas del océano primordial, Nun. La vida procede del medio acuático.

## EL AGUA EN CIRCULACIÓN

El Salmo 104: 5-9 (Esplendor de la Creación), hace una de las primeras descripciones incompletas del ciclo hidrológico, donde nos cuentan cómo el agua de lluvia acaba en el océano: “Del océano cual vestido la cubriste (la Tierra), sobre los montes persisten las aguas, al interceptarlas Tú emprenden la huida, se precipitan al oír tu trueno y saltan por los montes, descenden por los valles hasta el lugar que Tú las asignaste (el océano), un término las pones para que no vuelvan a cubrir la Tierra”. Más completo es el intento descriptivo de ciclo hidrológico dado en Isaías 55: 10: “Como bajan la lluvia y la nieve del cielo y no vuelven allí sino después de emparar la tierra...”. El hombre bíblico expresa su experiencia religiosa en el contexto científico de su época, y al ser un libro escrito en distintos momentos históricos, nos puede ayudar a comprender la evolución del conocimiento; aunque la Biblia no es propiamente un libro científico sino un libro espiritual.

La circulación del agua configura la estructura de la cosmogonía incaica. Para este pueblo, el Universo tendría su origen a partir de un mar primordial. El lago Titicaca, en Bolivia, sería una de las manifestaciones de dicho mar, y en tal lugar

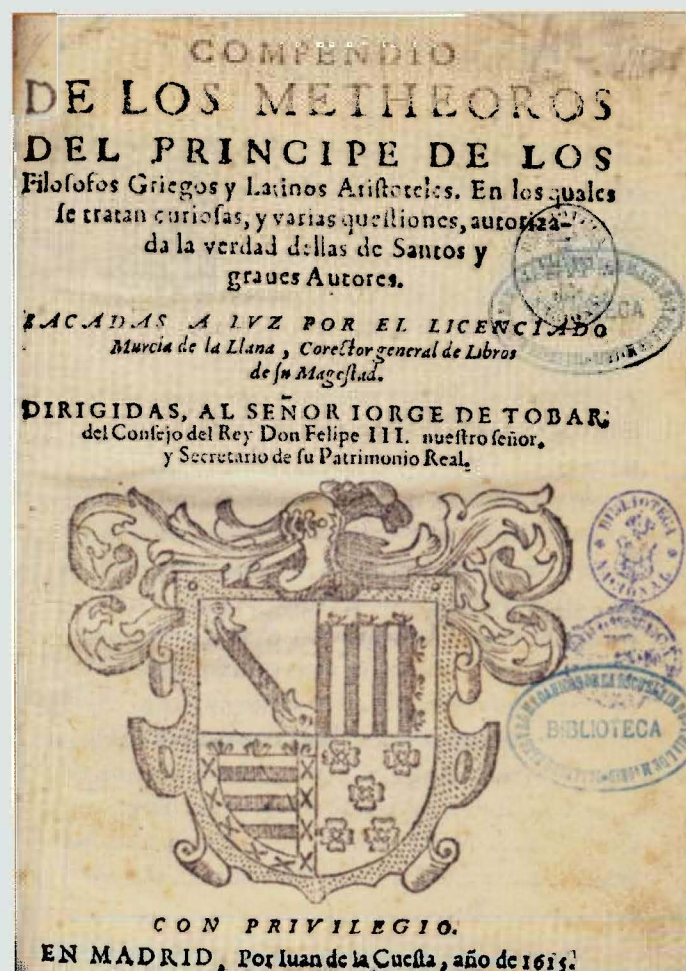
## Encuadre histórico general: cultura, ciencia y tecnología de las aguas subterráneas

nacerían el Sol, la Luna y las estrellas. El mar primigenio, llamado *Mama Qocha* o madre de todas las aguas, quedó abajo/adentro y desde él se nutrieron, desde abajo y por movimiento vertical, fuentes, manantiales y lagos, naciendo así los ríos. El ciclo hidrológico se completa con el agua circulando desde el mar cósmico hacia el firmamento, como un gran río llamado *Mayu*, y del cielo retornaba a la Tierra (Urton, 1981; Mazadiego *et al.*, 2009).

Desde los tiempos más remotos el hombre se preguntaba: ¿de dónde vienen y a dónde van a parar las aguas? Y enseñada surgieron interpretaciones mitológicas o mágicas, ya que los conocimientos eran escasos y casi no se transmitían, pues las ideas novedosas circulaban con gran lentitud. Una cuestión planteada por los filósofos griegos era: ¿cómo es que el mar se bebe toda el agua que procede de caudalosos ríos que mueren en él sin variar su nivel? La solución al enigma fue: el mar se traga toda el agua que le echen porque no tiene fondo, por debajo están los abismos (de *abyssus* - *abyssi*: sin fondo). En la Biblia, de acuerdo con el contexto cultural de sus autores, los abismos soportan las raíces de los montes, y allí bajó Jonás en el vientre de la ballena.

### EL AGUA PROCEDE DE LOS ABISMOS A TRAVÉS DE LAS CAVERNAS

Decía San Isidoro de Sevilla (556-636), en las *Etimologías*, XIII, 20, 1 (627- 630) que: “*Abyssus* es la insondable profundidad de las aguas ocultas en las cavernas, de las que proceden las fuentes y los ríos o de las que discurren ocultamente bajo Tierra”. Esta idea tal vez proceda de Thales de Mileto (h. 639-547/6 a.C.). Para el pensador heleno, el agua no sólo es el origen del Universo, sino que partiendo de los océanos



Edición española del siglo XVIII de La Meteorología de Aristóteles.

llega hasta el interior de las rocas, por acción del viento y del oleaje, surgiendo de esta forma por los manantiales. La procedencia cavernaria del agua, que tal vez fue intuita en la visita a algún macizo kárstico, perdurará como verdad científica durante cerca de veinticuatro siglos.

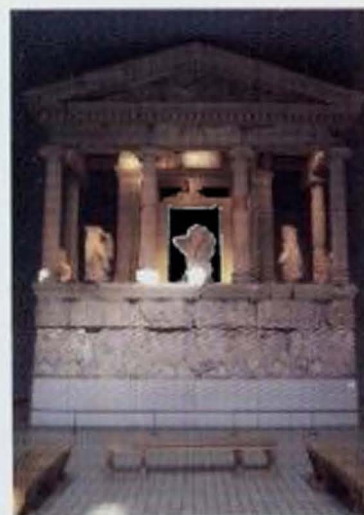
Esta idea parte de la cosmogonía griega: arriba moraban los dioses, en el monte Olimpo, a cuyos pies, y por debajo de los Campos Elíseos, estaba la gran caverna, *El Tártaro*. Allí,



en las profundidades, el barquero *Caronte* ayudaba a cruzar el lago subterráneo a los remitidos al infierno. El filósofo Platón (h. 428/427-347 a.C.), en su libro *Fedón*, señala que todos los manantiales se nutren de *El Tártaro*, caverna alimentada por las aguas del océano.

En *Critias*, Platón realiza una descripción parcial del ciclo hidrológico. El agua de lluvia pasa a los ríos, de estos va a los océanos, retornando posteriormente a tierra firme a través de las cavernas. Todavía no se hablaba de infiltración, ni de evaporación.

La visión del discípulo de Platón, y autor de *La Meteorología*, Aristóteles (384-322 a.C.), es algo más completa. Para él, las fuentes presentan tres posibles orígenes: 1) ascensión por fisuras y cavernas, a modo de la succión de una esponja; 2) el vapor de agua se eleva desde el interior, condensándose; 3) parte del agua que circula por las cavernas se origina por infiltración del agua de lluvia.



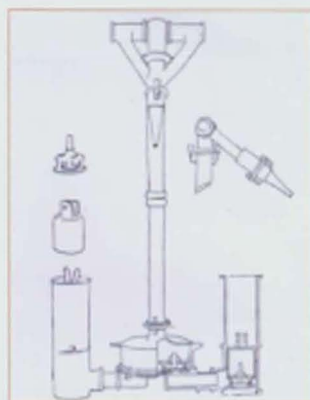
Tumba de las Nereides (Mausoleo Real de Arbinas) en Xantos de Licia, Turquía (410-400 a.C.). Se encuentra en el British Museum de Londres.

## INNOVACIONES TECNOLÓGICAS GRECO-LATINAS

A los griegos se les asigna el invento de la bomba de agua por succión, llamada de Ctesibio, por la supuesta paternidad de Ctesibio de Alejandría (285-222 a.C.), sabio al que se deben varios inventos hidráulicos. También el tornillo de Arquímedes (287-212 a.C.), llamado tornillo egipcio, coclea o caracol. Asimismo, inventaron el molino hidráulico: Antipaster de Salónica (siglo IX a.C.) cuenta cómo *Ceres* (diosa de la abundancia), manda bailar a las ninfas para que empujen la rueda del molino: "Había ordenado a las ninfas acuáticas que desempeñasen su dura tarea haciendo girar las paletas del rodezno" (Manzano, 1995). No cabe duda que en el uso del agua, observamos un mayor desarrollo tecnológico que científico, cuando lo que cabría esperar es que la tecnología se forje con el progreso de la ciencia.

Son también importantes las aportaciones de la época romana. Así Marco Vitruvio (siglo I a.C.), en *De Architectura*, describe cocleas, bombas de Ctesibio, rodeznos y norias. Estas últimas máquinas podrían ser: 1) ruedas de cangilones, movidas por fuerza de sangre; 2) cadenas de cangilones, movidas por fuerza de sangre; 3) norias accionadas por la propia corriente. De estas últimas, aún se conserva alguna activa, tal y como ocurre en Hama, Siria (de 20 m de diámetro), movidas por las aguas del río Oronte.

Estas técnicas se usaron con profusión en la minería española de época romana, cuando el desagüe



Bomba de Ctesibio de las minas de Sotiel-Coronada depositada en el Museo Arqueológico Nacional, según Goisé (1942).

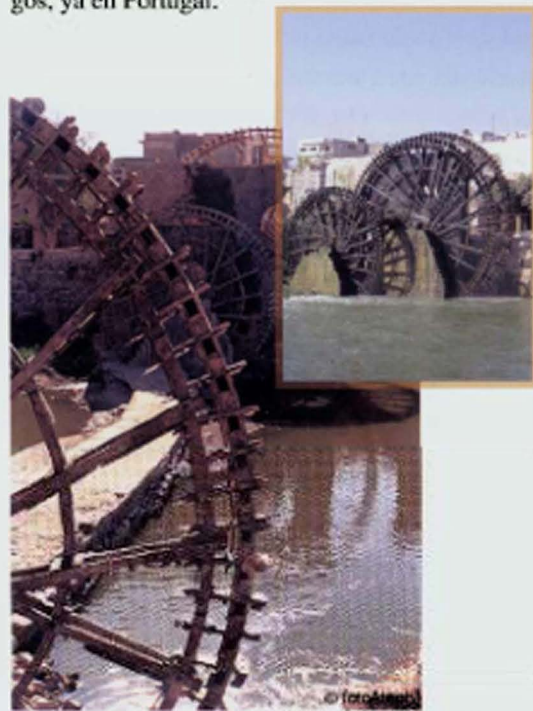


Diosa Conventina, divinidad acuática romana (Museo de Newcastle, Gran Bretaña).



Fuente eterna juventud, Siracusa.

realizado por socavón se complicaba o no era posible. Tornillos de Arquímedes fueron empleados en las minas de El Centenillo (Jaén), Diógenes y Las Cuevas (Ciudad Real), Posadas (Córdoba), o en algunas de la Faja Pirítica Ibérica y de la Sierra de Cartagena (Murcia). Bombas de Ctesibio se conservan, en buen estado, al menos dos: una en el Museo Arqueológico Nacional, procedente de Sotiel-Coronada (Huelva), y otra que ha sido descrita recientemente por el arqueólogo Claude Domergue, procedente de la mina Emilia, en la Sierra de Cartagena (Murcia). Asimismo se emplearon norias, en serie y en paralelo, en la Faja Pirítica: este es el caso de Riotinto (Huelva), o de la mina de Santo Domingos, ya en Portugal.



Norias romanas de madera, en Hama (Siria), movidas por las aguas del río Oronte (Internet).

### DIVINIDADES ACUÁTICAS EN EL MUNDO GRECO-LATINO

Desde antiguo podemos hablar de la sacralidad de los lugares acuáticos. Para los griegos, *ninfas* y *náyades* protegían a todo río, arroyo o manantial. Hermosas y eternamente jóvenes se les pedía oráculo (consejos) y salud, siendo consideradas por el pueblo llano como las criaturas más beneficiosas del orbe.

Las ninfas de las fuentes se llamaban *creniades*. Las más famosas eran las *Nereides*, hermanas de *Thetys*, que tenían su panteón monumental en Xantos de Licia, Turquía (410-400 a.C.). Los ninfeos eran lugares de culto a las ninfas. Y la fuente de Ninfeo, en Siracusa, era denominada como la fuente de la eterna juventud.

Los romanos tuvieron creencias similares. Para Plinio el Viejo (23-79 d.C.), en toda fuente reside una divinidad, y para Séneca (4 a.C.- 65 d.C.), la súbita aparición de un manantial debería venir acompañada de la creación de un altar.

No cabe duda que la diosa *Conventina*, divinidad acuática romana, que se conserva en el Museo de Newcastle (Inglaterra), es una diosa *Matronae*, con su típica cornucopia de la abundancia.

### APORTACIONES A LA HIDROLOGÍA DE LOS PENSADORES ROMANOS

Los romanos no generaron excesiva ciencia, ni tuvieron relevancia en la Filosofía. Sin embargo, sí fueron importantes por sus grandes obras de infraestructuras hidráulicas y por su sentido jurídico.





Presa de Cornalvo (Badajoz), construida por los romanos (IGME).

Entre las aportaciones científicas hay que mencionar a Marco Vitruvio (siglo I a.C.), que avanza en la comprensión del ciclo hidrológico, al considerar la infiltración del agua de las nieves y su posterior surgencia por manantiales situados a menor cota.

Lucrecio (99-55 a.C.), en *De Rerum Natura*, da una solución a la pregunta: si las aguas proceden del mar, ¿cómo es que al surgir por los manantiales no son salobres? Para este autor, las aguas abandonan la sal a su paso por el interior la Tierra; así de paso, los pensadores de la época también podrían explicar el origen de los depósitos salinos de interior, la presencia de la llamada *sal de roca*.

Lucio Anneo Séneca (4 a.C.- 65 d.C.), mantiene, con el resto de los pensadores de la época, las ideas aristotélicas sobre el origen y circulación de las aguas superficiales y subterráneas. Séneca, en su interior, reflexionaba sobre cómo en lugares con escasas precipitaciones se mantenían las fuentes; así, una observación incorrecta de la naturaleza, le hace sostener que el agua de lluvia es insuficiente para nutrir los manantiales. El error de su razonamiento estaría, en que no consideraba todas las precipitaciones caídas en la cuenca de recepción, sino sólo las del entorno de la surgencia. Este equívoco permanecerá, al menos, durante dieciséis siglos.

## LOS ROMANOS Y LAS GRANDES OBRAS HIDRÁULICAS EN ESPAÑA

Los romanos solucionaron el abastecimiento urbano de agua de grandes ciudades, como Roma, gracias a la construcción de presas y acueductos. Desaparecidas las infraestructuras hidráulicas romanas, no volvieron a plantearse en profundidad hasta el siglo XIX. En España, un claro ejemplo de estas grandes obras sería la presa con aliviadero de Proserpina y el acueducto de Santa Eulalia, para traer caudales a Emérita Augusta, Mérida (Badajoz), aunque no sería el único punto de captación de caudales para dicha urbe.

En nuestro país se conservan numerosos acueductos, tal es el caso de Segovia, Tarragona, Toledo, Almuñecar (Granada) o Chelva (Valencia). Estos acueductos a veces cruzaban valles mediante sifones invertidos, contruidos en plomo o material cerámico, como es el caso del acueducto de Gior, que llevaba agua a Lyon (Francia). También hay presas romanas en Alcantarilla y Almonacid (Toledo), Cornalvo (Badajoz), Muel (Zaragoza), etc.; en total, unas cien en toda la península Ibérica, la mayoría en Extremadura, Aragón o Castilla-La Mancha (Arenillas, 2003; Aranda *et al.*, 2003; Castillo, 2007).

Hicieron canales para abastecimientos urbanos y para regadíos, también para desecar las lagunas Pontinas, y, con túnel incluido, para dar salida a las aguas del lago Fucino (ambos en Italia), o simplemente para trasvasar aguas de un río a otro. Este último caso sería el de Cella (Teruel), donde a través de un dificultoso recorrido de 14 km de longitud, llevaban caudales desde la cuenca del río Turia a la del Jiloca.

En Toledo se conserva un canal de 50 km de longitud. Pero, la mayor red de canales se relaciona con la minería. Así, en Las Médulas (León), las conducciones de caudales captados para las





Ejemplar de *Las Etimologías* de San Isidoro de Sevilla (Basilea, 1630) (ETSIM), donde se señala que las aguas "se incorporan al aire cuando se evaporan, ascienden a las alturas y toman posesión del cielo".

labores extractivas alcanzan los 600 km, siendo construidas en varias fases según progresaba la explotación. Individualmente, el canal de mayor longitud tenía 140 km de largo, y traía aguas del río Cabrera (Matías, 2005). Estas obras mostraban gran eficacia: las pendientes, en casos, eran de tan solo el 0,15%, y se construían con un nivel llamado *chorobates* (Matías, 2005). También evitaban, no sabemos cómo, la formación de remolinos en las curvas, debido al efecto de Coriolis.

Otra gran obra hidráulica minera, fue la de Monte Furado (Orense), donde se perforó una dura montaña en terrenos paleozoicos para desviar el río Sil, y así poder explotar un aluvión aurífero.

Asimismo, destaca la construcción de variadas instalaciones hídricas: baños y termas, como en Alanje (Badajoz), Bagante (Lugo), Caldas de Montbuy (Barcelona) o Gijón (Asturias); acequias como la de San Salvador, en Agreda (Soria), o la Condal, en Barcelona; fuentes como las de Muro o Medinaceli (Soria), Bécares (León), etc.

## EL AGUA AL PRINCIPIO DE LA EDAD MEDIA

La época visigótica no es un periodo tan oscuro como algunos la consideran, pues en ella hubo aportaciones científicas e innovaciones tecnológicas importantes.

San Isidoro de Sevilla (556-636), en *Las Etimologías*, señala que las aguas "se incorporan al aire cuando se evaporan, ascienden a las alturas y toman

posesión del cielo". Es una de las primeras citas que conocemos sobre la evaporación, aunque probablemente la idea no sea de San Isidoro, ya que este fue un recopilador de conocimientos anteriores. Cuando en la época romana Lucrecio señala que, "el sol descompone el mar con sus rayos" (Reyes, 1979), es posible que no piense en la evaporación, sino en reacciones entre elementos básicos: agua, aire y calor.

San Isidoro, en el libro X de *Las Etimologías* (*De instrumentis hortorum*), menciona las ruedas vitruvianas, norias, garruchas (poleas para sacar agua de pozos) y cigüeñas (pértigas articuladas, con el mismo fin). También comenta la existencia de redes de canales y acequias, así como el pago por las horas de riego. El agua es un bien escaso y, por tal circunstancia, adquiere un precio.

En *El Fuero Juzgo*, legislación visigótica basada en el Derecho Romano, se da prioridad al agua para su empleo en molinos o para la navegación. También se penalizan los hurtos de agua.

## PERSISTENCIA DE LAS SUPERSTICIONES ACUÁTICAS

San Martín de Braga (h. 510/515-579/580), en *De correctione rusticorum*, lucha por eliminar de *Gallaecia* la veneración de las ninfas y otros cultos hídricos arraigados por siglos en la población.

Para los celtas estaba clara la sacralidad de los lugares acuáticos, siendo frecuentes las ofrendas votivas en lagos o manantiales; este sería el caso, por ejemplo, del caldero de Gundesdrup (Dinamarca) (Sharkey, 1994). El río Marne recibe el nombre de *Matronae*, diosa de la fecundidad. El río Sena, de *Sequane*, diosa del manantial.

*Sulevia* y *Maponos* eran divinidades célticas de los manantiales curativos. No cabe duda que los recursos hídricos a veces muestran virtudes sanadoras; este sería el caso de las aguas cloruradas que son buenas para los ojos, y cuyos manantiales quedan bajo la advocación de Santa Lucía. Asimismo, las aguas con cinc ayudan a cicatrizar las heridas, etc. Por eso estos lugares han sido venerados desde la antigüedad.

Algunas de estas divinidades hídricas célticas se cristianizaron, adaptándose al nuevo ambiente cultural de Europa, debido a la dificultad que tenían los pueblos para abandonar sus usos y costumbres ancestrales. Sobre la fuente santa de Ataún (Guipúzcoa), se levantaría la ermita de Nuestra Sra. de los Remedios. De igual forma, *Brígida*, diosa acuática con atribuciones curativas, se convierte en Santa Brígida. Asimismo, la noche del solsticio de verano, rica en ritos relacionados con el agua, se convierte en la fiesta de San Juan Bautista, santo importante, relacionado con las aguas bautismales. Fuentes curativas dedicadas a este santo son, por ejemplo, las de Igantzi (Navarra), o Mungoiti (Vizcaya) (Barandiarán, 1961).

## APORTACIONES HIDROLÓGICAS DE LOS MUSULMANES

Los musulmanes peninsulares, trajeron la técnica oriental de fabricar minas o túneles horizontales para captar caudales subterráneos. En España, tenemos claros ejemplos en las minas para abastecimiento urbano del Barrio Alto de Jaén, o del casco histórico de Palma de Mallorca, así como las empleadas en los regadíos de la Comunidad Valenciana o Tarragona.

El arabista Juan Vernet Ginés, en *Historia de la Ciencia española* (1968), señala: "Existe la teoría que el nombre de la capital de España, procede del sistema de riego y de abastecimiento

de aguas todavía practicado hoy en ciudades del Próximo Oriente, llamado *Mayrá*, por lo que la ciudad árabe se llamó *Mayrit*". En Madrid, las minas de agua funcionaron hasta mediados del XIX.

Los árabes aportaron un importante vocabulario hidrológico, como en el resto de los campos, a la lengua española; es el caso de: *azud* (presa), *aljibe* (depósito subterráneo de agua), *zahorí* (buscador de aguas subterráneas), *arcaduz* (cañería), etc.

En el campo científico, el geógrafo y científico persa Al Biruni (973-1048), explica la evaporación.

Asimismo, en el campo de la tecnología, Ibn Al-Razzaz Al-Jazari (1136-1206), en el *Libro de los métodos neumáticos y mecánicos* (1206), presenta un curioso dibujo de un ingenio hidráulico, donde se aprecia, puede que por primera vez, el paso mediante engranajes del movimiento horizontal al vertical. También es curioso el diseño alabeado de las paletas, buscando un mayor rendimiento energético.

En nuestro país, los árabes construyeron acueductos, como el de Medina Azahara, ejecutado por orden de Abderramán III. Levantaron acequias, como las del Plencia y del Turia (Valencia), o las de la Vega de Granada. Y también norias o floras, tal es el caso de Abarán o Alcantarilla (Murcia), Albaracín (Teruel), La Albolafia (Córdoba), o la del Palacio de la Noria (Toledo). Recientemente se ha descubierto un *qanat* en Fuentelapeña (Zamora) del siglo IX. Otras instalaciones hídricas serían los baños (*hamman*) tales como los de Jaén, Gerona, Mallorca, Córdoba, Alhama de Granada, etc.



Imagen del Libro de los métodos neumáticos y mecánicos (1206) de Ibn Al-Razzaz Al-Jazari.





Escudo de Módena (Italia).  
Las barrenas laterales de inspección geológica se añadieron en 1473.

### SONDEOS, POZOS ARTESIANOS Y OTRAS APORTACIONES CRISTIANAS

El pozo artesiano más antiguo se hizo en Francia, hacia el año 1126, en la Cartuja de Lillers (Artois) (antes *Artesa*, de ahí el nombre de pozo artesiano). No hay datos sobre la construcción del sondeo por los monjes, pero se supone que emplearon el método chino de percusión, ya que el nivel permeable del Cretácico se ubica a varios cientos de metros de profundidad.

Parece ser que son algo posteriores algunos sondeos realizados en Módena, al norte de Italia, en cuyo escudo medieval aparecen dos barrenas de sondista cruzadas, que fueron añadidas a dicho emblema el año 1473.

De todas formas, la existencia de caudales artesianos es muy antigua, ya que para su existencia solo hace falta hacer un sondeo donde la geología sea la adecuada. Así, Olimpiodoro de Alejandría (h. 495-570), describe ya la existencia de un pozo surgente construido en un oasis de Egipto. Y muchos siglos antes se señala en el Génesis (26: 19), cómo los siervos de Isaac encontraron un pozo de aguas vivas (brotan sin ayuda) y en el *Libro de Jeremías* también se habla de Dios como manantial de aguas vivas.

Para el pensador del medioevo, los motivos de ascenso del agua artesiana eran variados. Así, según Santo Tomás de Aquino (1225-1274), estaba clara la influencia de los astros. Sin embargo, para Azañs, el agua ascendía influida por el calor (el agua artesiana, procedente de zonas profundas,



Fuente sifoniana de Vaucluse (Francia) (Internet).

suele estar caliente, debido simplemente al gradiente geotérmico natural).

Los pensadores medievales cristianos recuperan los textos aristotélicos. De esta forma San Alberto Magno (1193/1206-1280), señala que las cavernas son los almacenes subterráneos del agua que nutren a los manantiales.

El poeta Petrarca (1304-1374) canta a la fuente de Vaucluse (*Vallis Clausa*: Valle Cerrado). Se trata de un sifón, organizado en terreno kárstico, que cuando se ceba pasa de emitir 20.000 L/s a un potentísimo caudal de 150.000 L/s. Para tal prodigio, hay que considerar la existencia de una zona de alimentación que es de 200.000 ha. No cabe duda que este fue uno de los misterios hidrológicos inexplicables de la Antigüedad.

En España, Alfonso X El Sabio (1221-1284), en *Las Partidas*, señala que el propietario de las aguas es el dueño del terreno: "Nadie puede negar a un vecino que haga pozo o fuente, a no ser que fuese con intención de destajar las venas...". Es la primera norma legal sobre aguas subterráneas



*Presa de Tibi (Alicante) que comenzó a construirse en 1580 por Juan Bautista Antonelli. En su tiempo fue la más importante de Europa, debido a su altura que supera los cuarenta metros (Internet).*





Bernard Palissy (1510-1590).



Presa de Tibi, según el padre Antonio Cabanilles (siglo XVIII).

que conocemos (Puche, 1996). En *Las Partidas* también se habla de la prioridad en el uso del agua para molinos, ferrierías y navegación. Las ferrierías hidráulicas aparecerán hacia el siglo X o XI, gracias a un invento medieval: el eje de levas.

En nuestro país, durante este periodo, se hicieron grandes obras hidráulicas, como el pantano de Cardete, el canal de Tauste (1220), o la presa de Almansa (1348), que tiene una altura de 26 m y una longitud de coronación de 85 m, anticipándose así a las grandes obras del Renacimiento. Destaca también la presa de Tibi, en Alicante (1580), con una altura de 42,7 m y capacidad de 3,7 hm<sup>3</sup>. Esta obra del arquitecto Pere Esquerdo, fue iniciada por Juan Bautista Antonelli (1527-1588) y culminada por Juan de Herrera (1530-1597), así como por el italiano Juanelo Turriano (1501-1585). Se aprecia cómo, poco a poco, van aumentando las dimensiones y capacidades de las presas.

### EL RENACIMIENTO: LA OBSERVACIÓN COMO BASE DEL CONOCIMIENTO

El Renacimiento se caracteriza por una mejora en el conocimiento gracias al desarrollo del método inductivo. La observación sistemática y el ordenamiento de los datos obtenidos, llevarían a la definición de los primeros principios geológicos. La apertura de nuevas rutas comerciales y, sobre todo, el invento de la imprenta, serán los grandes puntales de apoyo para la difusión de las ideas.

La importancia de la observación se recoge en la obra de Bernard Palissy (1510-1590), *Discours admirable*

*de la nature des eaux et des fontaines* (1580), cuando escribe: "No he tenido nunca otros libros que el cielo y la tierra, cuyas páginas están abiertas para todos". El libro se estructura como un debate entre *Teoría* (los clásicos) y *Práctica* (su experiencia personal), ganando esta última. La conclusión de Palissy es que las fuentes se engendran por el agua de lluvia, en contra de lo que quince siglos antes dijese Séneca. Palissy también es el primero, que sepamos, que habla de la teoría y práctica de la sonda (Peñuelas, 1851).

A nivel tecnológico, hay que destacar la mejora en los métodos de bombeo, expuestos con claridad en la obra de Georgius Agrícola (1494-1555), *De re metallica*. En sus dibujos, podemos observar el uso de complejos sistemas hidráulicos en minería, tal es el caso de bombas aspirantes-impelentes dispuestas en serie y en paralelo, movidas por energía hidráulica. También sobresale Leonardo da Vinci (1452-1519), que deduce la fórmula de conservación de la masa en un curso de agua (el caudal es el resultado del producto de la velocidad por la sección), y también representa norias y coqueas (cfr. *Códice Atlántico*).

### ANTECEDENTES DE LA DESALINIZACIÓN Y TEORÍAS ORGANICISTAS

René Descartes (1596-1650), en *Principia Philosophiae* (1644), considera la existencia de grandes alambiques subterráneos, que transformaban el agua marina de origen en el agua dulce de las fuentes, por destilación, gracias al calor interno de la Tierra (Descartes concebía la Tierra como una superposición de capas, con un gran núcleo central de naturaleza ígnea). Para este autor, el agua vaporizada en el interior de la Tierra llegaría a las más altas llanuras y montañas y, tras su condensación, surgiría por los manantiales.

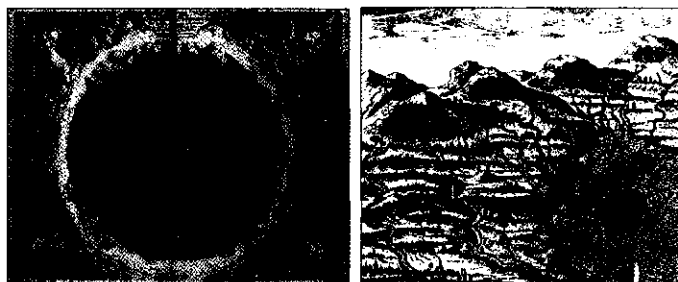
En España tenemos las primeras noticias de desalación de agua marina en el siglo XVI. Andrés Laguna (1499-1559), propone en 1556, desalar agua de mar por destilación. Asimismo, Miguel Martínez de Leyva indica, en 1597, haber encontrado un método para desalar el agua del mar, sin explicar cómo era. De igual forma, el marino portugués al servicio de Castilla, Pedro Fernández de Quirós (1565-1614), en su viaje por el Pacífico (1605-1606), antes de descubrir Australia, dice que los marineros de la expedición saciaron su sed con agua del mar desalada (Bentabol, 1900).

El jesuita Anastasius Kircher (1601/1602-1680), en *Mundus Subterraneus* (1664-1665), considera la Tierra como un gran animal, que bebe agua de mar y, como producto de su metabolismo, expele agua dulce (teorías organicistas). En el mar había sumideros, tal es el caso de los remolinos de Maelström, frente a las costas de Noruega, a partir de los cuales se alimentaban las cavernas. Desde éstas, y a través de una red de conductos llamados *hidrophylacios*, salía el agua hacia los manantiales. Kircher influirá en autores españoles posteriores como el padre José de Zaragoza (1627-1679), Vicente del Olmo (1611-1696) o Torres Villarroel (1694-1770).

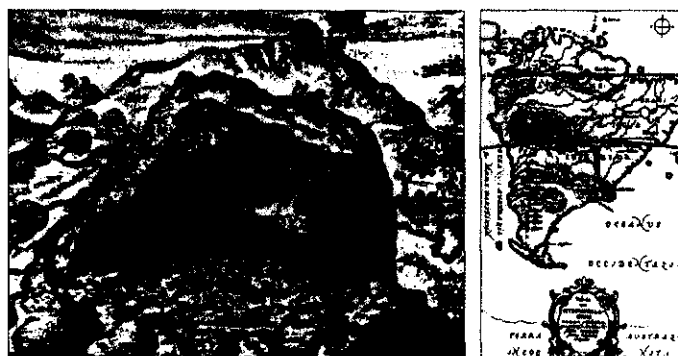
## EL AGUA Y LA BIBLIA.

### PERSISTENCIA DE LAS TEORÍAS CLÁSICAS

El siglo XVII en Europa Occidental, se caracteriza por la influencia bíblica literal en el saber geológico. Hasta el siglo XIX, no se harán lecturas hermenéuticas e interpretativas de acuerdo con los distintos estilos literarios que componen las distintas obras de este multilibro: biográficos, jurídicos, mitológicos, etc. En este contexto, el médico Jan Baptist van Helmont (1577-1644), en *Ortus medicinae*, id



*Distribución de hidrophylacios (conductos hídricos subterráneos y cavernas) y remolinos de Maelström (Internet).*



*El agua pasa del mar al interior de la Tierra, produciéndose el relleno de las cavernas. Gran hidrophylacio subandino, del que se nutren todos los caudales de superficie de Sudamérica (Internet).*

*est initia physicae inaudita: progressus medicinae novus in morborum vltionem ad vitam longam* (1648), señala el origen de los caudales en una fuente vivificante inextinguible, de acuerdo con un texto del Génesis: “había una fuente que subía del interior de la Tierra para regarla, pues el Señor no había hecho llover aún sobre la Tierra”. Por otro lado, en su faceta alquímista, van Helmont consideraba que el agua era el principal constituyente de la materia. Estamos en un período donde se inicia una somera experimentación (Helmont fue pionero en ello).

El inglés John Woodward (1665-1728), en *Brief instructions for making observations in all parts of the world* (1696),



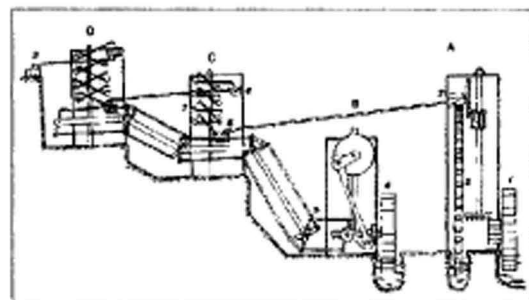


Ejemplar de *De l'origine des fontaines* (1674), de Perrault (Biblioteca de la ETSIM).

situó un gran abismo en el interior del globo terráqueo, comunicándose éste con el mar y la tierra a través de una serie de conductos o canales internos.

Todavía se mantiene la línea de recuperación de los clásicos. Así, tenemos la obra de Juanelo Turriano (1501-1585), *Los veinte y un libros de los ingenios y máquinas* (hay quien dice que este libro es autoría del aragonés Pedro Juan de Lastanosa, †1576), donde se señala: "dicen los geólogos que el agua de las fuentes viene del mar" (López Azcona, 1985). Juanelo fue autor del famoso ingenio de cucharas para subir agua a la ciudad de Toledo, superando un importante desnivel (más de 100 m desde el Tajo hasta el Alcázar). La energía procedía de la propia corriente del río.

También el catedrático de la Universidad de Alcalá, Alfonso Limón Montero (1628-1695), en el *Espejo Cristalino* (1697), trata sobre el origen de las fuentes. Este autor realiza un protoinventario de recursos hidrológicos de toda España (salvo Cataluña), describiendo 41 fuentes, 6 ríos, 5 lagos y 19 baños.



Artificio de Juanelo Turriano para llevar el agua del Tajo a la ciudad de Toledo (según Joaquín Martínez Copeiro del Villar).

## LA EXPERIMENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

Si se demostraba empíricamente la idea expresada por Bernard Palissy que el agua de lluvia, caída en un territorio, es suficiente para alimentar los manantiales y las fuentes, se derrumbarían las tesis clásicas. El francés Pierre Perrault (1611-1680), en *De l'origine des fontaines* (1674), recoge las mediciones realizadas, entre 1668 y 1670, de las precipitaciones habidas en la cuenca alta del río Sena, demostrando que las aportaciones pluviométricas eran superiores a los caudales de escorrentía. Perrault también estudió la ascensión capilar, comprobando que no se podía formar un depósito de agua, con saturación, por encima del nivel freático.

La obra del físico francés y prior del monasterio de Saint Martin-sous-Beaune, Edmé Mariotte (1620-1684), *Du mouvement des eaux et des autres corps fluides* (1686), se publicaría a los pocos años de su muerte. Este autor había comprobado, en el Observatorio de París, la infiltración de agua en los días de lluvia. También aforaría el Sena por el método del flotador, llegando a la siguiente conclusión: "es evidente que si la tercera parte de las precipitaciones se evapora, sobre la superficie de la Tierra quedará un volumen de agua suficiente para mantener el caudal conjunto de ríos y pozos de la cuenca".

Se iba clarificando poco a poco el diseño del ciclo hidrológico y, por tanto, cuantificando sus componentes, pero faltaban medidas de evapotranspiración. El astrónomo británico Edmund Halley (1656-1742), estudió la evaporación en la zona del Mediterráneo. Este proceso justificaría la pérdida del agua aportada al mar por los ríos.

## EL AGUA EN EL PERIODO ILUSTRADO EN ESPAÑA

La Ilustración plantea el desarrollo del conocimiento partiendo de la idea de progreso. Es la época de la búsqueda de la razón y del enciclopedismo (cómputo y difusión de datos). También en la ciencia destacan la cuantificación de los procesos: sólo vale lo que se puede medir, pesar o contar, y aparecen importantes conflictos culturales y religiosos, *fides et ratio*. Es una época de cambios, en la que la humanidad camina hacia la primera revolución industrial.

En 1724, el *veedor* de conducciones y maestro mayor de fuentes de la Villa de Madrid, Theodoro Ardemens (1664-1726), publica *Fluencia de la Tierra y curso subterráneo de las aguas*. Esta obra se considera el primer tratado hidrológico hispano completo, ya que considera tanto la génesis de los manantiales, como la prospección y captación de caudales. Poco después, aparecen las obras de Juan Claudio Aznar de Polanco (1663-1736), *Arithmética inferior y geometría práctica y especulativa*, *Origen de los nacimientos de las aguas dulces y gordas de esta coronada Villa de Madrid; sus viages subterráneos, con la noticia de las fuentes públicas, y secretas de las casas de señores y particulares, y la cantidad que tiene cada uno* (1727), y *Discurso curioso, regla general para aforadores* (1729).

El beneditino Benito Jerónimo Feijoo (1676-1764), en el *Teatro crítico universal* (T. III. Discurso V) (1726), desaprueba a los zahoríes y su vara adivinatoria, ya que no se fundamenta en ningún principio filosófico, llamándoles "embaucadores y pactadores con el diablo". Estamos ante la entrada en España del racionalismo que campea en Europa.

En 1761, aparecen los *Comentarios a las Ordenanzas de Minas*, de Francisco Javier de Gamboa (1717-1794), donde

podemos comprobar el estado del conocimiento hidrogeológico. Gamboa señala cinco posibles orígenes para los manantiales: 1) el agua llega a las montañas por los movimientos o tempestades del océano, como la contracción del corazón actúa sobre la sangre; 2) la Tierra es como una esponja seca que aúpa las aguas del mar; 3) los cilindros o columnas que forman las aguas del mar, introducidas por los canales de la Tierra, fuerzan el ascenso del agua; 4) la causa es el calor subterráneo, ya que al hervir el agua en un alambique, las partes más ligeras se separan de las más crasas y suben, favoreciendo que en los montes se condense el agua y las gotas se introduzcan por grietas y cavidades, descendiendo por acción de la gravedad; 5) modernamente se admite que se deben a las lluvias, y también que el agua de evaporación se condensa en las montañas, originando manantiales y fuentes.

El médico Pedro Gómez de Bedoya y Paredes, va a escribir la primera enciclopedia hidrográfica hispana, publicación de una cierta entidad. Se trata de una obra de 6 volúmenes (el tercer tomo no pasó la censura), *Historia universal de las fuentes mineras de España* (1764-1765). En ella se describen las fuentes, ordenadas de forma alfabética, con relatos históricos, análisis cualitativos, etc. En total, 1.214 citas de fuentes, pozos, ríos y lagunas.

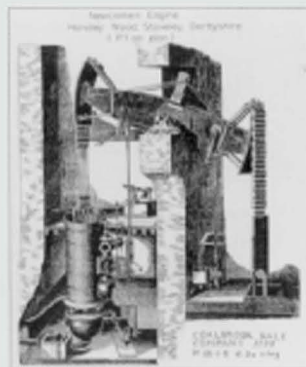
## MÁQUINAS PARA BOMBLEAR AGUA

El español Jerónimo de Ayanz y Beaumont (1553-1613), patentó una máquina de vapor para desaguar las minas de Potosí en 1606 (García Tapia, 1992),

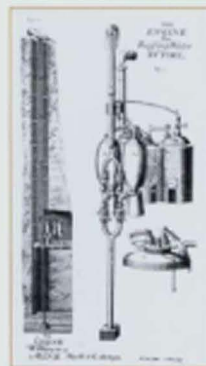
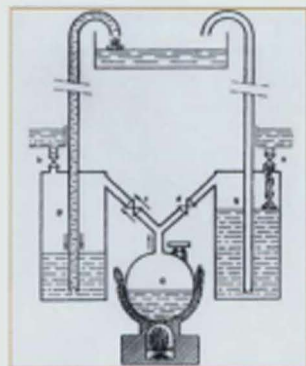


Comentarios a las Ordenanzas de Minas (1761) de Francisco Javier de Gamboa.





Máquina de Newcomen (1712).



Máquinas de vapor de Ayanz (1606) y Savery (1698).

cerca de cien años antes que Thomas Savery (1650-1715) hiciese lo propio en Inglaterra (1698).

La máquina de Savery se disponía con su caldera de vapor dentro de la mina y los humos salían al exterior a través de una larga chimenea. Realizar la combustión en el interior de las explotaciones era algo complicado, por la falta de ventilación. El proceso consistía en generar vapor y, con éste, llenar un depósito, a través de una válvula anti-retorno. Luego se cerraba la válvula y se enfriaba el depósito de forma forzada, regando con agua fría. El vapor se condensaba, haciéndose así el vacío en el depósito. Éste, a través de una tubería con válvula anti-retorno, se conectaba con la balsa de desagüe de la mina, y al hacerse el vacío succionaba hacia sí dichos caudales, de forma ascendente, hasta que se llenaba. El vapor a presión generado a posteriori, tras la apertura de la válvula correspondiente, se encargaba de vaciar el depósito, expulsando el agua fuera de la mina.

En 1712, Thomas Newcomen (1663-1729) y su socio Savery, llevarían la caldera al exterior de las labores, eliminando los problemas anteriores. El movimiento de sube y baja que repercute en el émbolo, se transmite a través de un vástago mediante un balancín, y éste es accionado directamente por la máquina de vapor.

Mejoras en la máquina de Savery trajeron, en 1765, la máquina de James Watt (1736-1819), y con ella aparecerá la primera revolución industrial. De esta forma se puede decir con rotundidad que la resolución del tema del desagüe en las minas, ha tenido importantes consecuencias en cuanto a la evolución tecnológica, industrial y social de la humanidad.

### CONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE LAS CUENCAS: AGUA PARA LAS CIUDADES Y LA AGRICULTURA

En 1822, el ingeniero de minas Abdon Jacques Frambourg Garnier (1785-1865), ganaría un premio de la Real Sociedad Agrícola de Francia, gracias a su obra *Traité sur les puits artésiens, ou sur les différentes espèces de terrains dans lesquels on doit rechercher les eaux souterraines ouvrage contenant la description des procédés qu'il faut employer pour ramener une partie de ces eaux a la surface du sol, à l'aide de la sonde du mineur ou du fontenier*. Esta publicación tuvo gran éxito, y en 1826 apareció la segunda edición. La necesidad de mejorar la producción agrícola, trajo el interés por los pozos artesianos.

En 1827, William Smith (1769-1839), para algunos autores el padre de la Estratigrafía, es el que realiza el primer reconocimiento geológico, incluyendo perfiles, para el abastecimiento urbano de agua. Esto ocurrió en Scarborough (Gran Bretaña); aunque parece ser que, en este tema, hay al menos un antecedente, Antonio Vallisneri (1661-1730), que realizaría cortes geológicos en relación con pozos surgentes del norte de Italia, en 1714.

Cristóbal Bordiu (1798-1872), fue enviado a Francia e Inglaterra para visitar pozos artesianos, y pedir permiso a Garnier para traducir su obra al castellano, cosa que hizo en 1829. Poco después, en 1831, el Gobierno comisionaría al ingeniero de minas Isidro Sainz de Baranda y al ingeniero de caminos Bernardo de Borja Tarrius, para que estudiaran zonas favorables para abrir pozos artesianos en Extremadura. En 1835, enviaron por el mismo motivo a Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859) a Castilla la Vieja.





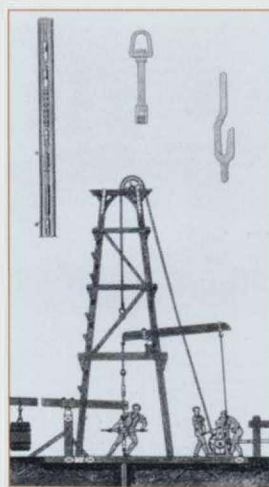
Bomba de la Samaritana (París).

## SONDEOS PROFUNDOS

Con la revolución industrial, las ciudades cada vez tenían más población y las necesidades de agua crecían. La vieja bomba de la *Samaritana*, que desde 1715 sacaba agua del río Sena, en París, dejó de funcionar en 1813. En 1832 una epidemia de cólera asoló la ciudad y su alcalde, el físico François Jean Dominique Arago (1786-1853), encargó al empresario George Mulot (1792-1872), la construcción de un pozo artesiano para abastecer de agua limpia a la capital francesa.

En La Grenelle, Mulot perfora el suelo en busca de aguas artesianas. Al llegar a 548 m de profundidad, los equipos de perforación alcanzan el acuífero, surgiendo un chorro de 4.000 m<sup>3</sup>/día. Este fue el primer gran sondeo profundo realizado para buscar agua, y su ejecución duró desde 1833 a 1841, casi ocho años.

En la *Guide du sondeur* (1847) del ingeniero Joseph Degoussé, se describe el proceso de perforación en La Grenelle. Se trataba de un sondeo de percusión, con un trépano suspendido por una cuerda. A través de la soga se transmitía el movimiento de sube y baja desde un balancín, accionado por



Sondeo chino de percusión, empleado en La Grenelle (según Degousse, 1847). Pozo artesiano de La Grenelle.



dos operarios (fuerza de sangre), gracias a un mecanismo manual de biela-manivela. El proceso era discontinuo, ya que se debían sacar los ripios.

Los pozos profundos se pusieron de moda y en 1841 se hicieron sondeos en Hamburgo y Nápoles. En 1846 también se hizo un pozo de más de 300 m en Venecia. Asimismo, en 1847 se realizó el primer pozo profundo de España, en Vilabertrán (Gerona) que alcanzó entre los 120 y 140 m.

El 23 diciembre 1854, George Éugene, barón de Haussmann (1809-1891), encarga a Charles Gossself Kind, ingeniero alemán, perforar un nuevo pozo en Passy (París), para alimentar de caudales los lagos del Bois de Boulogne. Entre 1855 y 1861, Kind, tras superar numerosos problemas (p.e. el bloqueo del trépano a 324 m de profundidad), finaliza la perforación del segundo sondeo profundo realizado en la capital francesa, encontrando agua a 586,5 m, con un caudal de 17.000 m<sup>3</sup>/día. En el sondeo de Passy se introdujo el torno de vapor, en funcionamiento desde 1840, y la cuerda de la que pendía el elemento perforante fue sustituida por una sarta de varillas de





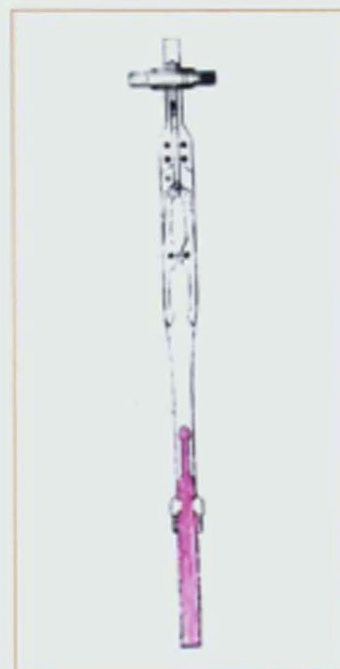
Sondeo de Passy. Le Monde Illustré, 2 abril de 1857.



Placa conmemorativa del sondeo de Passy y fuente, en la plaza de Lamartine (París) (Internet).

abeto. El resultado de estas mejoras tecnológicas favoreció un menor tiempo de obra que en La Grenelle. En la plaza Lamartine de París, sobre la pared de una fuente, hay una placa conmemorativa de este sondeo.

Las innovaciones en sondeos fueron muchas y aparecieron en un corto espacio de tiempo, no solo por la necesaria búsqueda de caudales artesianos profundos, sino también por el inicio de los pozos de petróleo en 1855, en Pennsylvania (EE.UU.). En 1834, Pierre Pascal Fauvelle (1797-1867), introduce las varillas huecas, y en 1844 la perforación hidráulica. En 1834, Karl von Oeynhausen (1797-1865), inventa el sistema de corredera para que el vástago no recibiese la repercusión del impacto; esto dio paso al trépano de caída libre ideado por Kind, en 1846 (Bentabol, 1880). En los sesenta, Alphonse Richard dota de giro al trépano anterior. En 1862, el relojero suizo Rodolphe Leschot (1837-1876), idea la sonda de diamantes, antecedente del rotary, inventado en EE.UU. a finales del XIX. Esta



Trépano de caída libre de Kind (1846).

sonda suponía un avance de 5m/día (Mesa, 1909). Los problemas de Leschot fueron la fijación de los diamantes en la corona de perforación (Vahl, 2008). La aportación española se la debemos al ingeniero y brigadier Amador del Villar y Pérez Castropol (1843-1916), que diseñó una herramienta que realizaba el oficio de trépano, ensanchador y limpiador al mismo tiempo; la perforación se hacía mediante movimiento giratorio, a cada golpe (Maffei, 1880).

### LEYES CONCERNIENTES A LA CIRCULACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Henry Darcy (1803-1858), estudiando filtros para el abastecimiento urbano de una ciudad del norte de Francia, tal y como vemos en *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* (1856), se dio cuenta que la velocidad del agua que atraviesa un terreno permeable es proporcional a la pérdida de carga por unidad de longitud, estableciendo la famosa fórmula que lleva su nombre. Darcy es la primera persona que desarrolla una ecuación matemática en relación con el movimiento de las aguas subterráneas. La dificultad de esta ley estaría en su campo de aplicación, debido a la diferente geometría y falta de homogeneidad del medio poroso; sin embargo, este autor abrió la puerta a los estudios de la hidráulica subterránea.

El ingeniero Arsène Jules Dupuit Étienne (1804-1866), en 1863, obtiene una fórmula logarítmica sobre la piezometría de las aguas que fluyen hacia el interior de un pozo en bombeo, considerando el acuífero como infinito y homogéneo. Siete años después, Adolf Thiem (1836-1908), modificaría la fórmula anterior, mediante el bombeo en un pozo y la observación de los efectos producidos en pozos vecinos. Más tarde, el austriaco Phillip Forkheimer (1852-1933), señala la validez de la ecuación de Laplace, definiendo las líneas equipotenciales



y las de flujo en las superficies piezométricas. A conclusiones parecidas, y de forma independiente, llega el norteamericano Charles Slichter (1864-1946).

En general, la mecánica de fluidos en medios porosos avanzará de la mano de Josep Boussinesq (1904), Edmond Maillet (1905) y, más adelante, con Andrés Parchet (1923), entre otros (Margat, 2007).

## LAS NOVEDADES HIDROGEOLÓGICAS LLEGAN A ESPAÑA

José Mariano Vallejo y Ortega (1779-1846), formado en París y requerido por Fausto Elhuyar (1755-1833) para elaborar el Mapa Geológico de Cataluña, escribe en 1833 el *Tratado sobre el movimiento y aplicaciones de las aguas*. En dicha obra se atreve a cuantificar el ciclo hidrológico, cuando señala que el 30% del agua de lluvia llega al mar. También menciona la existencia de zonas favorables para pozos artesianos.

En 1849, la Comisión del Mapa Geológico inicia su andadura estudiando la geología del país, incluidas las aguas subterráneas. La monografía más importante de aquellos primeros años vendrá firmada por Casiano de Prado: se trata de la *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid* (1864), en la que se señalan zonas favorables para pozos artesianos y se realiza el inventario de recursos hídricos. Este será el modelo a seguir para las sucesivas memorias provinciales. En dicho contexto, el ingeniero de minas Federico de Botella y Hornos (1822-1899), en la *Descripción geológica y minera de las provincias de Murcia y Albacete* (1868), da noticia de la existencia de una cuenca artesiana en Murcia. Gracias a este dato encontraron caudales a tan sólo 35 m de



Vista actual de la presa vacía en el Pontón de la Oliva (Madrid) (Octavio Puche).

profundidad, ayudando así, con su captación, al desarrollo agrícola de la provincia.

En 1851, se resuelve el abastecimiento de agua a Madrid, gracias a las obras del Canal de Isabel II. El ingeniero de minas Casiano de Prado (1797-1866), había señalado que el río Lozoya podría perder sus aguas en la franja cretácica del Pontón de la Oliva, en el caso de que se hiciera allí la presa, como así ocurrió.

En 1853, el médico Pedro María Rubio escribe el *Tratado completo de las fuentes minerales de España*, donde se citan 724 manantiales.

Juan Vilanova y Piera (1821-1893), persona formada en París (donde recibió una completa formación, buena parte de ella en la Escuela de Ingenieros de Minas), recibió un premio de la Real Academia de Ciencias por el *Manual de Geología Aplicada a la Agricultura* (1861). Como vemos, también en España hay un gran interés por el desarrollo agrícola. En su obra, Vilanova cita a los autores franceses de los que se nutre: Dumas, Belgrand, el abad Paramelle,

## Encuadre histórico general: cultura, ciencia y tecnología de las aguas subterráneas

Degoussé, etc. El geólogo Vilanova habla de *hidrografía subterránea*; todavía no se emplea la palabra *hidrogeología*. La primera cita en España de la palabra *hidrogeología*, se la debemos tal vez al ingeniero de minas Luis Mariano Vidal, en 1877 (Puche, 1996). Este autor expone el ciclo hidrológico con claridad, señalando la existencia de aguas subterráneas en terrenos permeables rodeados de formaciones impermeables; divide, asimismo, los pozos en normales, artesianos e inversos o absorbentes.

### LA PRIMERA LEY DE AGUAS DEL MUNDO Y OTROS AVANCES

En 1869, el arquitecto Mariano Calvo y Pereyra, escribe *De las aguas tratadas bajo el punto de vista legal, y con aplicación a las construcciones y abastecimientos de las ciudades en sus diferentes usos*, donde se recogen en orden cronológico todas las leyes que afectan a las aguas. Hay que destacar la Real Orden de 4 de marzo de 1846 (en la Década Moderada) donde se exige autorización Real, previa instrucción de expediente, para empresas que pretendan el uso, aprovechamiento y distribución de las aguas. Pero aparentemente sólo se piensa en el aprovechamiento de cursos de agua y aguas de superficie. El Estado empieza a plantearse el dominio sobre las aguas.

La primera Ley de Aguas del mundo con incidencia en los caudales subterráneos, fue con probabilidad la normativa española de 1866. En ella se declara el dominio del Estado sobre el recurso. Hasta entonces, las aguas pertenecían al dueño del terreno, pero a partir de esta Ley quien haga captaciones por pozos artesianos, socavones o galerías, será el dueño de ellas a perpetuidad (art. 48). El dueño del terreno puede negarse a las obras, pero el Gobernador, oídas las razones, puede

otorgar el permiso y su correspondiente servidumbre al demandante (al alumbrador), siempre que la obra se realice en terrenos de baldío (art. 51), con la expropiación pertinente. En definitiva, en dicha Ley, según indica Alejandro Nieto (1968), se tocan tres temas importantes: la propiedad de las aguas subterráneas, el derecho a perforar la superficie y el derecho sobre el subsuelo.

Otro tema importante de la Ley de Aguas de 1866 es el establecimiento de la prioridad del agua para abastecimiento de las poblaciones, así como navegación, riegos, industria y conducción de maderas (Martín-Retortillo, 1960). Para el jurista Eduardo García Enterría (1955), “la Ley de Aguas de 1866 constituye el monumento legal más prestigioso de nuestra legislación administrativa del siglo XIX”.

Con la llegada de la I República, se promulgó la nueva Ley de Minas (1868), que considera las aguas subterráneas como sustancias de naturaleza minera (art. 4). Y se mantiene la idea que el subsuelo se halla bajo dominio del Estado (art. 6). El subsuelo empieza donde acaban las labores agrícolas o donde llegan las cimentaciones de los edificios (art. 5). Estas sustancias pueden explotarse mediante la concesión pertinente, cuya propiedad está separada de la propiedad del suelo (art. 9). Asimismo, por Real Orden de 30 de marzo de 1872, se establecen los expedientes de alumbramiento, informados por las Jefaturas de Minas.

Tras la República vino la Restauración y con ella la Ley de Aguas de 1879, derogándose la Ley de Minas de 1868. En dicha ley, las aguas siguen sin pertenecer a los propietarios, sino al perforador. En ella se introdujo alguna mejora, como la distancia mínima necesaria entre pozos. De igual forma, no se menciona el tema expropiatorio (que tuvo que subsanarse por Real Decreto de 15 de junio de 1905 y posteriores).

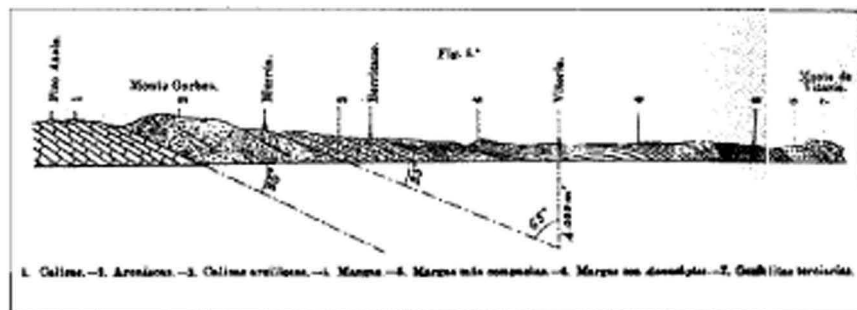
La bondad de esta ley hizo que su duración fuese más que centenaria, ya que estuvo vigente hasta 1985.

Un año antes, en 1878, aparecerá la primera obra de síntesis de las aguas subterráneas y superficiales en España, *Tratado de las aguas de riego*, del ingeniero de montes Andrés Llaudó y Fábregas (†1895).

Los *fontaneros* y sondistas franceses aterrizaron en nuestro país para extraer agua mediante el desarrollo de pozos profundos, traídos fundamentalmente por las compañías del ferrocarril, buena parte de ellas impulsadas por el desarrollo minero de la segunda mitad del siglo XIX. Es el caso de Alphonse Richard que, tras realizar una serie de captaciones hídricas en diversas partes de España, fue contratado para realizar un sondeo de abastecimiento de agua a la ciudad de Vitoria. La perforación se inició en noviembre de 1877, y el trépano, así como varios equipos de rescate, quedaron atrapados en el interior en el mes de septiembre de 1881, a una profundidad de 1.021 m. Este pozo fue, sin duda, uno de los más profundos de su época en todo el mundo, ya que poco antes, en Sperenberg, cerca de Berlín, se había llegado a los 1.225 m (Bentabol, 1880). Los técnicos de la Comisión del Mapa Geológico, con el ingeniero de minas Daniel Cortazar (1844-1927) a la cabeza, tras demostrar la inviabilidad del sondeo, se quejaron de la falta de estudios geológicos en estas obras de tan elevado coste (Adán de Yarza, 1885).

## LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS CIRCULAN CON LENTITUD

Entre 1876 y 1877, José Garcés estudia el manantial de Cella (Teruel), y se da cuenta que, tras largas sequías, éste entra en funcionamiento 50 o 60 días después de que la zona recibiese las precipitaciones necesarias. El agua



Corte geológico realizado por Daniel Cortazar (1884) demostrando la inviabilidad del sondeo de Vitoria.

subterránea circula con lentitud, es lo que garantiza su interés.

Siete años antes de que el ingeniero de minas Gabriel Auguste Daubrée (1814-1896) escribiese el famoso tratado *Les eaux souterraines a l'époque actuelle, leur régime, leur température, leur composition*, Juan Vilanova y Piera publicaría *Teoría y práctica de pozos artesianos y arte de alumbrar aguas* (1880). Para Vilanova los acuíferos están llenos por la infiltración secular: mientras que los pozos contribuyen a vaciarlos, la geología y la meteorología de cada región causan su reposición.

El ingeniero de caminos Gonzalo Moragas († h.1900), publica el *Estudio general sobre el régimen de aguas contenidas en los terrenos permeables e influencia que ejercen en los alumbramientos de galerías y pozos y especial régimen de corriente subterránea en el delta acuífero del Besós* (1896). Es uno de los primeros estudios de hidráulica subterránea en España: aguas caídas a 40 km del mar, llegan a él en dos días, mientras que las aguas subterráneas tardan veintisiete años; por tanto circulan cinco mil veces más despacio.





*Fuente de Cella (Teruel), obra arquitectónica construida en 1729 por el ingeniero italiano Domingo Ferrari. Fue estudiada por José Garcés entre 1876 y 1877 y comprobó que, tras largas sequías, el manantial entraba en funcionamiento 50 o 60 días después de las lluvias, lo que manifestaba la lenta circulación de las aguas subterráneas (Internet).*

## AL INICIO DEL SIGLO XX

Una obra que no se puede pasar por alto es *Las aguas de España y Portugal* (1900) del ingeniero de minas Horacio Bentabol. Este autor había escrito en *La Época* (14 de mayo de 1889) un artículo donde decía: “No es con canales, sino con aguas que se riegan los campos”, abriendo polémica con los ingenieros de caminos.

El libro de Bentabol consta de dos partes. La primera se dedica a la evaluación del régimen hidrológico y de ella se extraen algunas ideas del autor: 1) la lluvia es un fenómeno irregular, pero de cantidad sensiblemente constante en periodos de más de diez años; 2) son muy importantes las observaciones hidrométricas, pero hay pocos datos de evaporación; 3) la característica útil del agua subterránea es su escasa velocidad; 4) propone cuantificar el ciclo hidrológico con las técnicas de la época: aforar cauces, así como medir precipitaciones (con *eudímetros*) y evaporación (con *higrómetros agrícolas*), para deducir la infiltración. La segunda parte de su obra se enfoca al plan de reformas necesarias, proponiendo: 1) frenar la erosión mediante la forestación, muros de contención, así como la creación de embalses, tanto superficiales como subterráneos (recomienda todo tipo de acciones y obras para la recarga artificial de acuíferos, adelantándose en años a estas técnicas); 2) propone la creación de una Dirección Hidrogeológica Central, para acabar con los cantonalismos en temas de aguas. Bentabol está firmemente convencido que las aguas superficiales y subterráneas son un recurso unitario.

El libro fue criticado por el ingeniero de minas Adriano Contreras (1900), señalando que ni le convenían, ni le parecían prácticos los embalses subterráneos, y que esa idea ya la había expresado con anterioridad Antonio Montenegro en el

libro *Arte de la explotación del agua en pozos, fuentes y alumbramientos, convirtiendo en subterráneas las torrenciales* (1894). También se sumaron, a las posturas contrarias, ingenieros de caminos, como es el caso de Rafael Cordero en la *Revista de Obras Públicas*.

En 1908, la Comisión del Mapa Geológico inicia un estudio nacional de los recursos hídricos subterráneos, siguiendo la estela del Plan Gasset para las aguas superficiales. Pese a que muchos de los sondeos del siglo XIX en busca de aguas artesianas fracasaron, y se sembró la desconfianza sobre este recurso, autores como Mesa (1909), no cejaron en resaltar la importancia de los caudales subterráneos.

## LA HIDROGEOLOGÍA SE ESTRUCTURA COMO CIENCIA

En 1902, en el marco del U.S. Geological Survey, se establece una rama de Hidrología, *Hydrographic Branch*, que incluye una División de Aguas Subterráneas. En 1906, el nombre cambia a *Water Resources Branch*. Poco a poco la Hidrogeología se institucionaliza.

En 1921, Edouard Alfred Martel (1859-1938) publica *L'Hydrogéologie*, con datos importantes sobre los macizos kársticos. Ese mismo año, la asignatura de *Hidrogeología* entra en la Escuela de Ingenieros de Minas de la mano de Pablo Fábrega y Coello. Es la época en que Oscar Edward Meinzer (1876-1948) estructura en EE.UU. la materia como una nueva rama de la Geología Aplicada (Davis y De Wiest, 1966). Él sirvió como Jefe de la *Ground Water Division* del U.S. Geological Survey, desde 1912 hasta 1946.

## Encuadre histórico general: cultura, ciencia y tecnología de las aguas subterráneas

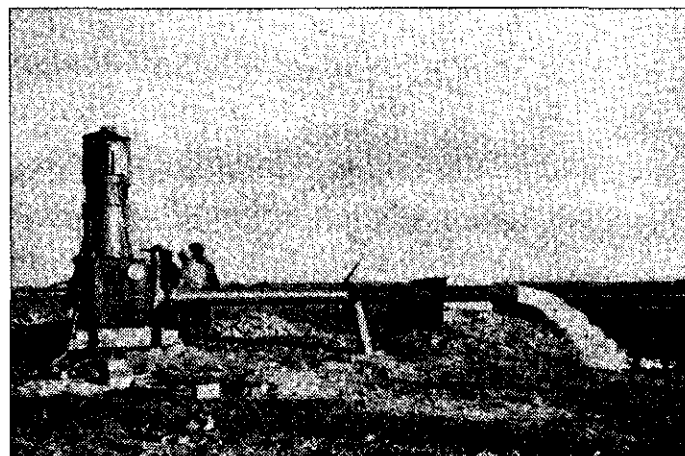
En la primera década del siglo XX, destacan las aportaciones de Charles Vernon Theis (1900-1987), que basándose en analogías de flujos de calor en conducción (medios homogéneos), descubrió, entre 1934 y 1935, la fórmula que expresa la variación del nivel freático en un sondeo de observación, en función del tiempo de duración del bombeo (Benítez, 1989). Charles Jacob (†1970) llegó a lo mismo por otros caminos. El método logarítmico de Theis y el semilogarítmico de Jacob, son empleados para determinar permeabilidades, mediante ensayos de bombeo. Entre los americanos, a parte de los ya mencionados, destacan los trabajos de Hazer, Muskat, Tellman, etc.

Durante el *Congreso Geológico Internacional* (IGC) celebrado en Argel en 1952, a iniciativa de la delegación francesa se decidió crear la *Association Internationale d'Hydrogéologues* (AIH), si bien no se constituyó oficialmente hasta la siguiente edición de 1956, en México. Poco después, en 1959, crearon un Comité de Mapas Hidrogeológicos, y como era un tema que preocupaba en la época, distribuyeron entre los miembros de la AIH un cuestionario sobre este asunto, y se crearon pequeños grupos para estudiar temas especiales (Mazadiego y Puche, 2009). Antes del IGC de Argel y con posterioridad a éste, los franceses hicieron muchos progresos hidrogeológicos, particularmente en la prospección: así, en el norte de África, destacan los trabajos de Ambroggi, Archambault, Berkaloff, Castany, Gauthier, Margat, Robaux, Schoeller, etc.

Por otro lado, se había creado la *Association Internationale d'Hydrogéologie Scientifique* (AIHS), que participa en la Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (UGGI) creada en 1919, como parte constitutiva (es el caso de Roma, 1954; Toronto, 1957; Helsinki, 1960). La UNESCO había encargado a la AIHS que preparase para Helsinki una exposición cartográfica (Mazadiego y Puche,

2009). En 1962, la AIH y la AIHS se reunirían en la sede de la UNESCO de París, para unificar criterios respecto de las leyendas a utilizar en los mapas, y obtener de esta manera una normalización de la simbología empleada. En el IGC de México hubo ya algunas comunicaciones sobre mapas hidrogeológicos (Mazadiego y Puche, 2009).

Los grandes tratados magistrales son algo posteriores al tejido científico-asociativo. Este es el caso de *Hydrogéologie* (1955) y *Eaux Souterraines* (1966) de Enry Schoeller; el libro de D.K. Todd (†2006) *Ground Water Hydrology* (1958); el *Traité pratique des eaux souterraines* (1963), y la *Prospection et exploitation des eaux souterraines* (1968) de Gibert Castany (1916-1963); así como *Hydrogéologie quantitative* (1981) de Ghislain de Marsil. En España destaca *Hidrología subterránea* (1976) de Emilio Custodio y Manuel Ramón Llamas. También ha tenido repercusión la traducción de *Hidrogeología* (1971) de S.N. Davis y R.J.M. De Wiest (versión original en inglés de 1966), así como las obras de otros autores tales como C.W. Fetter, *Applied Hydrogeology* (1980); R. Bowen, *Groundwater* (1986), entre otros.



*Bomba de eje vertical (1947), Quintanar de la Orden (Cuenca) (Meléndez y Fuster, 1975).*



En nuestro país, en 1929, el Instituto Geológico y Minero de España realizó un sondeo de más de 1.000 m en Alcalá de Henares (Madrid). En 1947 tenemos en España las primeras bombas de eje vertical y la posterior aparición, al final de la década, de los grupos sumergidos. Esto permitirá al Servicio de Aguas Subterráneas del Instituto Nacional de Colonización, a partir de 1955, la puesta en marcha de importantes regadíos, con la apertura de numerosos pozos.

En los últimos años, ha habido grandes progresos en la investigación regional, donde ha jugado un papel importante la Geofísica. Destaca el trabajo de José García-Siñeriz (1886-1974), *Geofísica aplicada a la prospección* (1935), y José Cantos (1939-2009), *Tratado de Geofísica* (1974).

No es objeto de este capítulo mencionar el progreso en la docencia, las asociaciones hidrogeológicas, publicaciones, cursos y congresos sobre esta materia, habidos en España en los últimos años, que ha sido muy significativo e importante. Se ha avanzado mucho en campos como el de la modelización de acuíferos, control informático, recarga artificial, geoquímica pre-isotópica e isotópica, hidrogeología de medios anisótropos (particularmente de zonas kársticas), gestión de recursos, etc. También han surgido problemas nuevos como la sobreexplotación, la salinización, la polución antrópica y la descontaminación (fertilizantes, pesticidas, hidrocarburos, metales pesados, etc.), la recarga y el confinamiento (de agua y otros recursos como el  $\text{CO}_2$ ) etc.



Sierra de Cazorla (Jaén), uno de los espacios naturales más bonitos de Andalucía, donde nace el río Guadalquivir (Internet).